第 40 卷 第 3 期
2022 年 9 月
天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY
Vol. 40, No. 3
Sept., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.03.06

基于北斗单系统观测数据的北斗坐标系对齐 ITRF 精度评估

曲伟菁[1]，刘 利[2]，周善石[1]，徐君毅[2]，杨宇飞[2]，胡小工[1]，
郭 睿[2]，董 明[3]，吴 斌[1]，唐成盼[1]，李晓杰[2]，刘 帅[2]

(1. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 2. 北京卫星导航中心，北京 100092； 3. 北京跟踪与通信技术研究所，北京 100094)

摘要： 采用 2019 年 10 月至 2020 年 3 月北斗观测数据获得单天台站坐标，实现 BDCS 并与 ITRF2014 对齐。利用单 GPS 观测数据的解算台站坐标和 IGS 提供的台站坐标对 BDS 观测数据解算结果进行精度评估，比较结果表明，采用 BDS 数据解算的台站坐标与 IGS 提供单天台站坐标差异的 RMS 均值小于 1 cm，与单 GPS 数据解算台站坐标差异的 RMS 均值小于 1.5 cm。用 BDS 数据解算台站坐标时间序列弥散度偏大，并对其原因进行了初步的分析。同时采用 GPS 观测数据初步估计中国区域监测站速度场，随着日后北斗导航系统的稳定运行以及北斗观测数据的累积，有望获得更高精度的台站坐标和速度及 BDCS 向 ITRF 的对齐。

关 键 词： 北斗导航系统；北斗坐标系；地球参考框架
中图分类号： P228, P128.4 **文献标识码：** A

1 引 言

2020 年 7 月 31 日，北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 开始向全球及中国周边地区提供 7 种类型服务[1]，其中通过卫星播发的导航服务包括：向全球提供米级的导航定位授时服务，向中国及周边地区提供的分米级星基增强服务和分米至厘米级精密单点定位服务[2−5]。与其他 GNSS 系统不同，北斗三号地面监控站主要分布于中国境内，监控站地理分布无法覆盖全球，会对卫星定轨、授时和全球服务产生影响，因此，星上搭载星间链路设备，利用星间双向测量数据分离卫星相对钟差和相对几何距离解耦卫星轨道和钟差，再把星间距离作为观测量结合地面测量数据进行星地星间联合定轨，由此实

收稿日期： 2021-11-23； **修回日期：** 2021-12-28
资助项目： 国家自然基金面上项目 (12173072)
通讯作者： 曲伟菁，quwj@shao.ac.cn

现境外测量[4−8]。Chen 等人[9]对北斗三号基本导航服务性能进行评估的结果表明，在有星间链路数据情况下，广播星历用户距离误差优于 0.1 m，广播钟差参数预报精度优于 1.5 ns，空间信号精度优于 0.6 m。

导航系统的高精度稳定服务以及兼容互操作性能都依赖于导航系统参考框架实现和维持精度。通常卫星导航系统采用地面监测站接收的观测数据进行卫星精密定轨与时间同步处理，生成导航电文信息，实现全球导航定位授时服务。而导航系统空间基准建立与维持的目的是精确测定并预报地面监测站在统一的地球框架中的位置和速度，具体方法是利用空间大地测量方法获得监测站历元坐标精确估计，再利用时间序列分析方法对监测站运动进行建模，估计监测站运动的线性和非线性模型参数，实现地球参考框架的维持。监测站历元坐标估计精度与卫星轨道精度和测量模型有关，参考框架维持精度与监测站运动建模精度有关。

目前，四大卫星导航系统 (GPS, GLONASS, Galileo 和 BDS) 均采用卫星大地测量技术实现监测站坐标估计，采取定期向国际地球参考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF)[10]对齐的方法实现空间基准的高精度和系统间兼容互操作性。由于各导航系统的地面站分布范围、建站条件、观测方法等各不同，导航系统空间基准实现和维持的具体方法存在一定差异。美国 GPS 坐标系 WGS84 得益于台站全球均匀分布和 GPS 卫星成熟的测量模型及动力学模型。全球均匀布站易于消除区域性整体运动对全球参考框架维持精度的影响，成熟的 GPS 处理方法包括统一系统参数、精化天线相位中心模型等，完备的参考框架处理方法最终实现 WGS84 与 ITRF 的高精度对齐和长期维持，WGS84 (G1762) 与 ITRF2008 的差异为 1 cm[11,12]。Galileo 坐标系 GTRF20V02 (Galileo Terrestrial Reference Frame) 与 ITRF2014 对齐精度小于 1 cm[13−15]。GLONASS 坐标系 PZ-90 (Parametry Zemli 1990) 对齐 ITRF2014 精度小于 2 cm[16−19]。

从 2013 年开始，北斗卫星导航系统采用 2000 中国大地坐标系 (CGCS2000)[20−22]。随着北斗全球系统的建设，北斗导航系统服务范围从区域扩展到全球，从 2017 年 12 月开始，北斗导航系统开始采用北斗坐标系 (BeiDou Coordinate System, BDCS)[23]。魏子卿等人[24]和 Wu[25]对北斗监测站分别进行了 4 期单独的 GPS 观测，利用 64 个全球均匀分布 IGS 台站和 8 个中国区域台站的 GPS 观测数据，首次实现 BDCS 并对齐 ITRF2014，监测站坐标精度为 1 cm，速度为 2 mm/a。施闯等人[26]利用 IGS/MGEX 全球观测网台站 GPS 与 BDS 数据联合处理方式，开展北斗坐标系建立和维持方法研究，实现毫米级台站坐标估计，采用的 BDS 数据是北斗二号观测数据。北斗二号系统主要为亚太地区用户提供定位、测速、授时和短报文通信服务，在轨卫星数为 5GEO/7IGSO/3MEO，而且主要覆盖区域仅亚太地区。随着北斗三号全球服务开通，在轨卫星已增加至 3GEO/3IGSO/24MEO，卫星覆盖区域也扩展至全球，因此利用北斗单系统卫星数据实现北斗坐标系的可行性和精度有待进一步分析研究。

2019 年 12 月，北斗官方正式对外公布北斗坐标系 BDCS (2019v01)，它是通过 2019 年 1 月 1 日至 3 月 31 日，全球均匀分布 120 多个台站 (包括 IGS 台站和北斗区域监测站) 的 GPS 观测数据实现并对齐 ITRF2014，精度为毫米级[27−30]。由于目前采用的观测数据时间

较短 (< 2.5 a)，无法估计精确的台站速度[31]，因此 BDCS 采用高频率更新方式 (更新周期为 1 a)，在更新周期内对各个监测站持续进行监测，以此来维持 BDCS 毫米级精度。

目前无论是 CGCS2000 还是 BDCS，都是通过 GPS 观测数据实现和维持，而不是依托北斗单系统观测数据，基于此，本文首先利用 2019 年 1 月至 2020 年 4 月北斗区域监测台站、中国大陆环境构造监测网络 (陆态网) 台站、全球分布 IGS 和 iGMAS 台站的单 GPS 观测数据，实现全球参考框架并对齐 ITRF2014，利用 IGS 提供的单天台站坐标对计算方法、分析模型和结果的可靠性进行验证。其次，采用相同的计算方法和分析模型，利用 2019 年 10 月至 2020 年 3 月北斗区域监测站、全球均匀分布 IGS 台站和 iGMAS 台站的单北斗系统观测数据，初步尝试获得历元台站坐标精确估计，实现 BDCS 并与 ITRF2014 对齐，利用单 GPS 数据解算的台站坐标和 IGS 提供的台站坐标进行精度评估。

2 数据处理方法

本文利用 GAMIT/GLOBK 软件[32]进行 GNSS 数据处理，根据台站数量分成几个子网，选取一定数量的稳定台站作为子网中的公共站，每个子网对卫星精密轨道、大气参数、极移、UT1 和坐标等参数进行估计，获得台站坐标的单天松弛解。对于 IGS 台站，如果有 ITRF2014 坐标，初坐标采用 ITRF2014 坐标，其他站采用单点定位坐标为初值。IGS 核心站的先验精度为 5 cm，其他站先验精度为 100 m。所有子网单天松弛解算之后，采用基于卡尔曼滤波的瞬时历元对齐 ITRF 方法[33]，对每个历元所有子网的单天松弛解通过最小约束方法进行综合解算，获得台站历元坐标精确估计，实现瞬时历元北斗坐标系，通过约束 IGS 核心站的 ITRF2014 坐标，将台站坐标对齐到 ITRF2014。最小约束方法即让参考台站坐标相对先验坐标的坐标差之间在最小二乘法意义下没有整体平移、旋转和尺度变化[33]。两个不同参考框架之间的转换通常采用 Helmert 变换方法，对于两个不同参考框架之间的转换采用 7/14 参数还是 6/12 参数，目前国际上仍然存有争议[34,35]，考虑其他导航系统采用 7 参数，为了实现各系统之间的兼容互操作，本文采用 7 参数。瞬时历元框架对齐 ITRF 流程如图 1 所示，GAMIT/GLOBK 中采用的分析模型如表 1 所示。

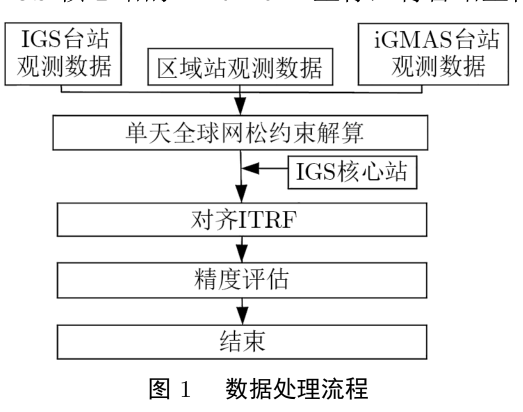


图 1 数据处理流程

3 GPS 数据实现全球参考框架对齐 ITRF2014 的精度评估

为了对第 4 章采用单 BDS 数据计算结果的准确性和可靠性进行验证，本章首先利用全球均匀分布台站的单 GPS 数据估算历元台站精确坐标和台站速度，实现全球参考框架对齐

表 1　数据处理采用的模型和估计参数

模型参数	
观测值	GNSS 卫星双差无电离层组合观测值 (LC) BDS: B1iB3i；GPS: L1L2
高度截止角	10°
采样率	30 s
卫星天线相位中心	IGS14.atx
对流层	IERS2010 convention[36]
高阶电离层	二阶电离层
固体潮	IERS2010 convention[36]
海潮	FES2004 model
极潮	IERS2010 convention[36]
相对论	IERS 2010 convention[36]
N体	JPL DE403
重力场	EGM2008 10×10
太阳辐射压	ECOM[37]
估计参数	
卫星轨道	位置和速度，每颗星每个弧段一组
太阳光压	每颗星每个弧段一组
大气时延	2 h 一组
大气梯度	南北、东西方向每 12 h 一组
台站坐标	每天

ITRF2014，并通过 IGS 提供台站坐标序列进行精度评估。

3.1　数据及台站分布

采用 2019 年 1 月 1 日起至 2020 年 4 月 20 日 220 个台站的 GPS 数据，包括北斗区域监测站、全球均匀分布的 IGS 站、中国大陆环境构造监测网络 (CMONOC 陆态网) 台站和 iGMAS 台站，台站分布如图 2 所示。为了对区域监测站进行长期监测，在每个区域监测站附近选取陆态网和 iGMAS 并址台站同时参与解算。在 BDCS (2019V01) 版本中采用的观测台站数量基础上增加了能接受北斗三号卫星观测数据的 IGS 台站，精密轨道和钟差文件来自于 IGS (https://cddis.nasa.gov/)。把 220 个台站分成 6 个子网，每个子网中公共台站有 40 个 IGS 稳定核心站，采用的松约束解算方法、模型、约束标准以及对齐 ITRF2014 方法如第 2 章介绍。图 3 给出每天有效的台站数量、对齐 ITRF2014 的约束台站数量以及观测卫星数量，可以看出每天观测台站数量在 2019 年初为 160 个左右，到 2020 年 3 月增加到 200 个台站左右，从 2019 年 8 月开始，台站数量增加。这是因为在 2019 年初期部分北斗区域台站运行尚不稳定，随着时间累积，区域台站运行稳定后，参与解算的区域台站及观测数据增多，部分历元有效观测台站数量少于 150 个也是由区域台站数量少所引起的。每天有效对齐 ITRF2014 的约束台站数量为 25 ～ 40 个，观测卫星数量为 30, 31 或者 32 个。

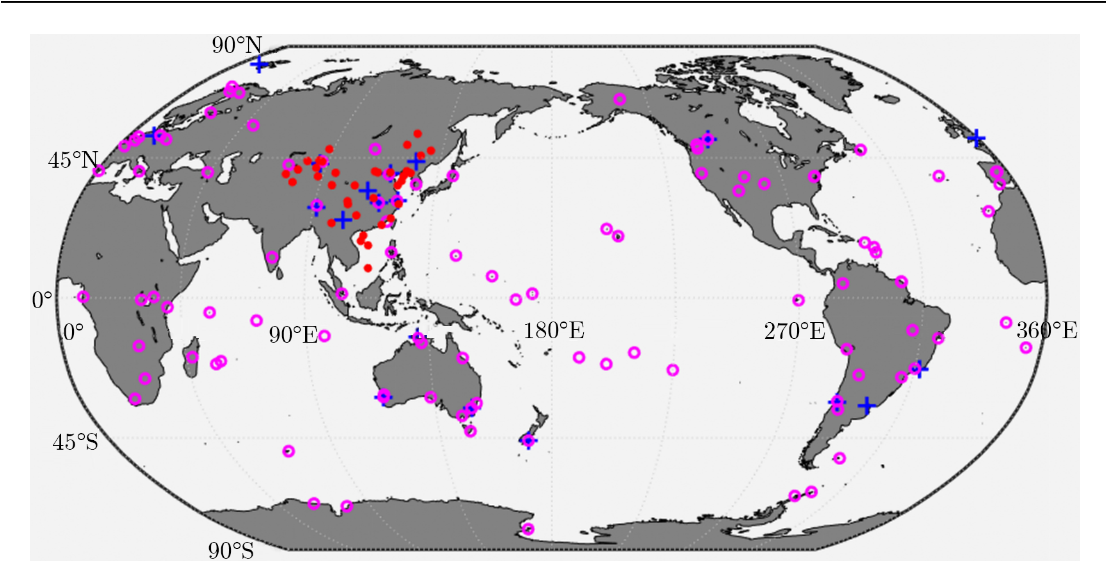


图 2 全球 IGS 台站 (紫色)、iGMAS 台站 (蓝色) 和陆态网台站 (红色) 分布图

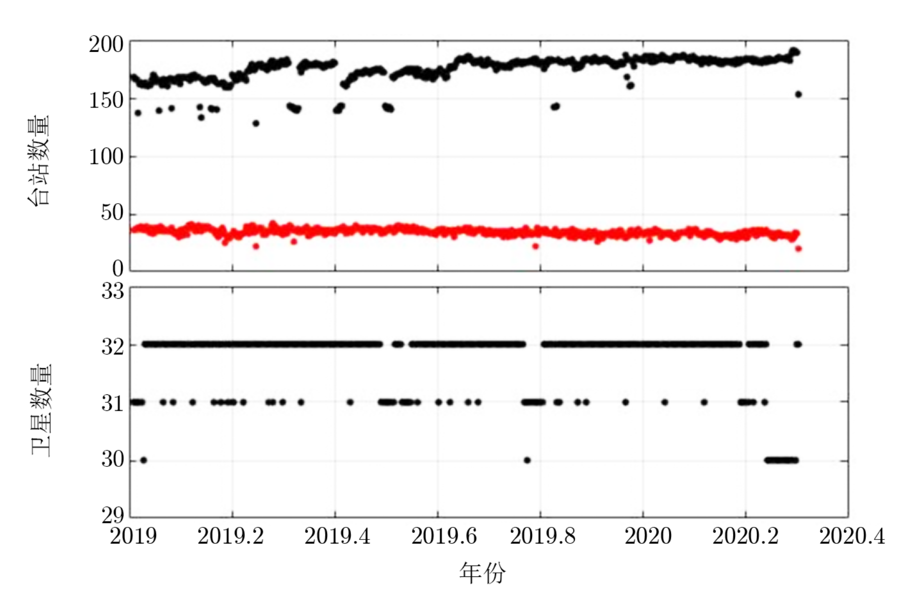


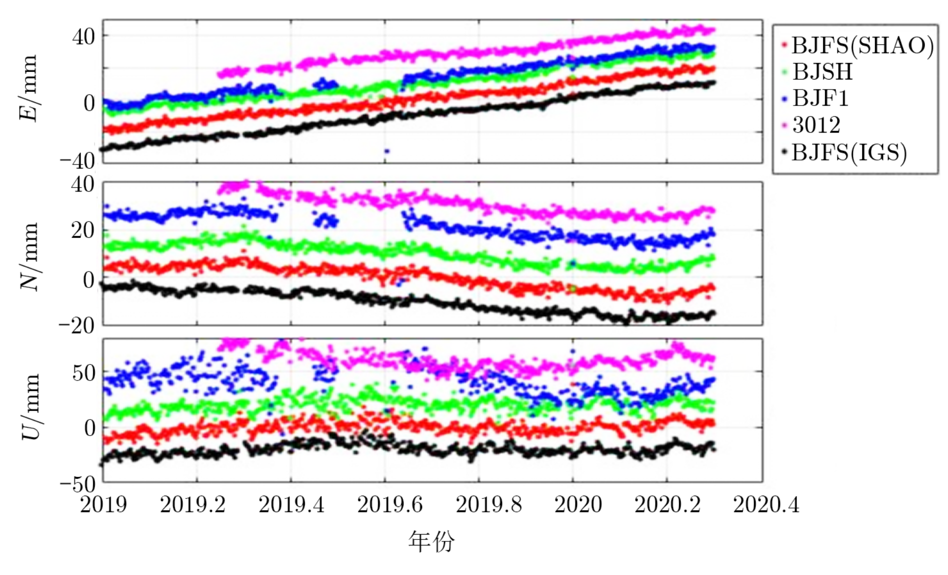
图 3 每天有效的台站数量 (上图黑色)、对齐 ITRF2014 的约束台站数量 (上图红色) 和有效的卫星数量

3.2 台站坐标精度评估

3.2.1 并址站坐标时间序列

从 260 个陆态网 GNSS 观测台站中选取与区域监测站距离最近的台站作为并址站，通过并址台站坐标时间序列可以对区域站的长期稳定性进行评估。以北京地区为例，该地区有 4 个并址台站，图 4 为各台站坐标时间序列，图中 BJFS (SHAO) 为本次解算 BJFS 台站，BJSH 为陆态网台站，BJF1 为 iGMAS 台站，3012 为区域监测站，BJFS (IGS) 为 IGS 解

算的 BJFS 站。为方便比较，图中每个台站水平方向偏移 10 mm，垂直方向偏移 20 mm。由图可知，5 个台站坐标时间序列水平与高程方向具有较好一致性，水平方向存在明显的趋势性变化。图 5 为内蒙古地区 4 个并址台站坐标时间序列，高程方向具有非线性特性。



注：E, N, U 分别代表台站坐标东西、南北、高程的量。

图 4　北京地区并址台站坐标时间序列

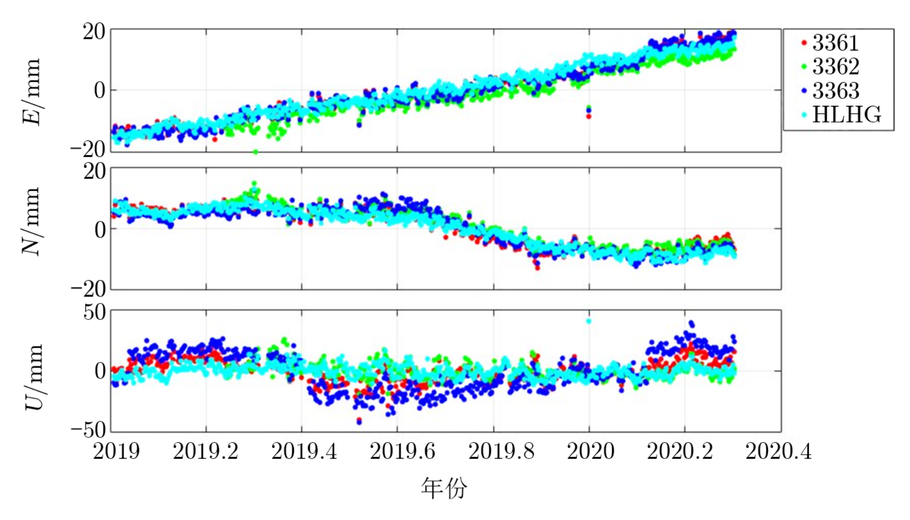
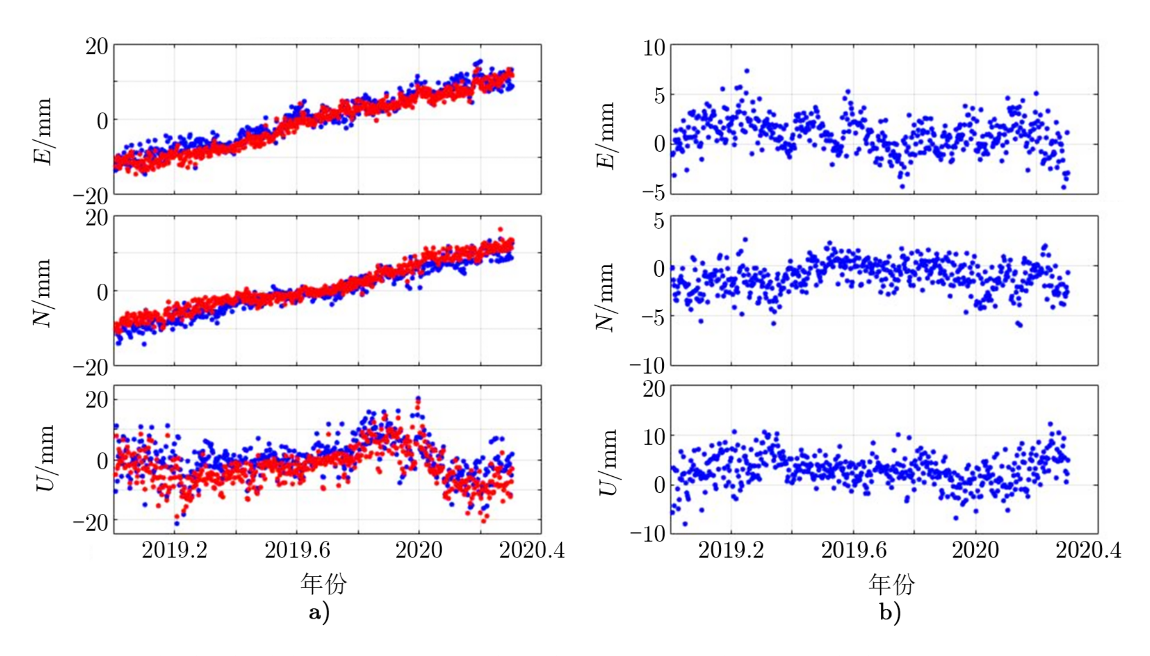


图 5　内蒙古地区 4 个并址台站坐标时间序列

3.2.2　台站坐标残差 *RMS*

采用 2019 年 1 月 1 日至 2020 年 4 月 19 日 IGS 提供的天解坐标值 (https://cddis.nasa.gov/) 对本次解算的 98 个 IGS 台站坐标精度进行检验。图 6 a) 为解算的 ABPO 台站与 IGS 提供的天解坐标时间序列图；图 6 b) 为两种序列坐标差异图，两种台站坐标时间序列吻合

性较好。图 7 为 98 个台站坐标在 E、N 和 U 三个方向差异的 RMS 统计，sta 代表台站，RMS 均值在 E 方向为 1.8 mm，N 方向为 1.8 mm，U 方向为 4.3 mm，结果表明采用 GPS 数据解算 IGS 台站坐标重复率优于 1 cm。



注：a) 为解算坐标 (蓝色) 与 IGS 提供天解坐标 (红色) 时间序列；b) 为两种序列坐标差异时间序列。

图 6 ABPO 台站坐标与 IGS 提供台站坐标时间序列

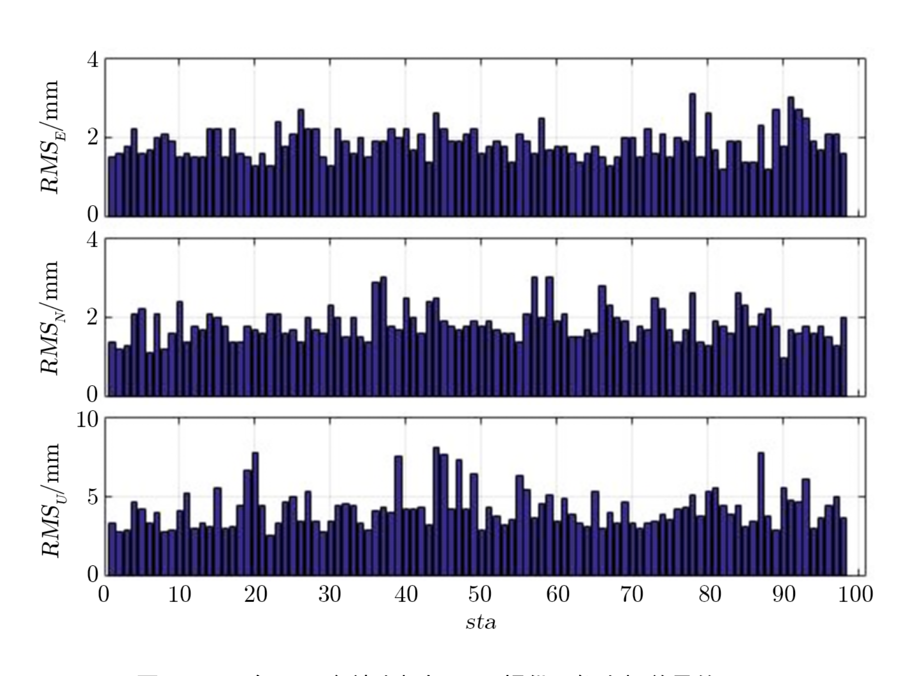
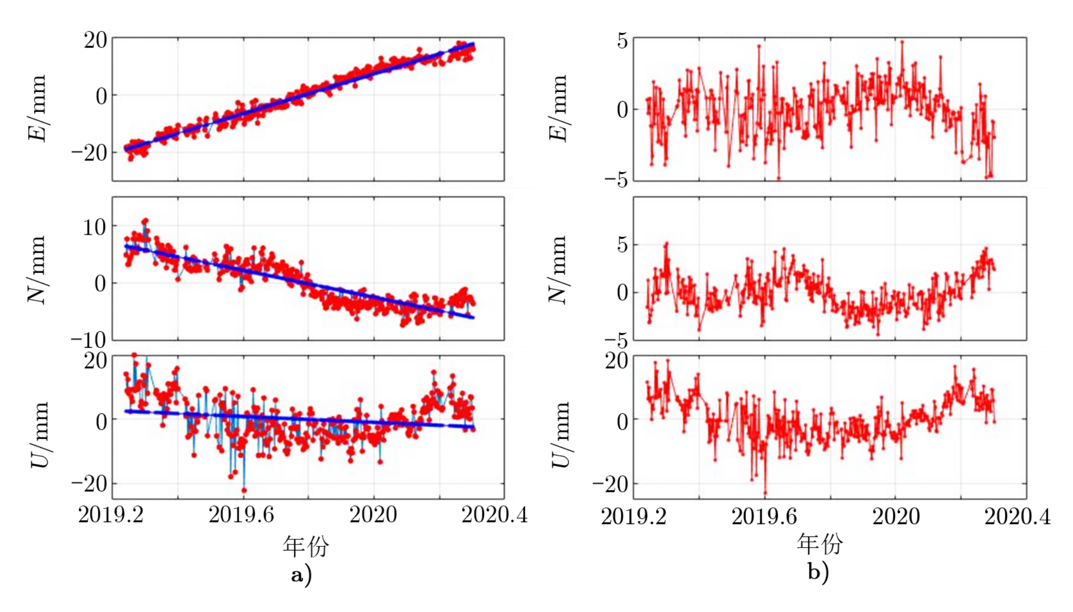


图 7 98 个 IGS 台站坐标与 IGS 提供天解坐标差异的 RMS

对于北斗监测台站，由于观测数据时间跨度短 (小于 2.5 a)，采用扣除线性趋势项方法对台站坐标精度进行分析。图 8 为区域监测台站 (3172) 的坐标时间序列。图 9 为 35 个区域监测站扣除趋势项后残差的 RMS 统计，RMS 均值 E 方向为 1.9 mm，N 方向为 2.2 mm，U 方向为 8.2 mm，结果表明采用 GPS 数据解算区域监测站坐标重复率优于 1 cm。



注：a) 解算台站坐标时间序列 (红色) 和拟合趋势项时间序列 (蓝色)；b) 扣除趋势项后残差时间序列。

图 8　采用 GPS 数据解算区域台站坐标时间序列

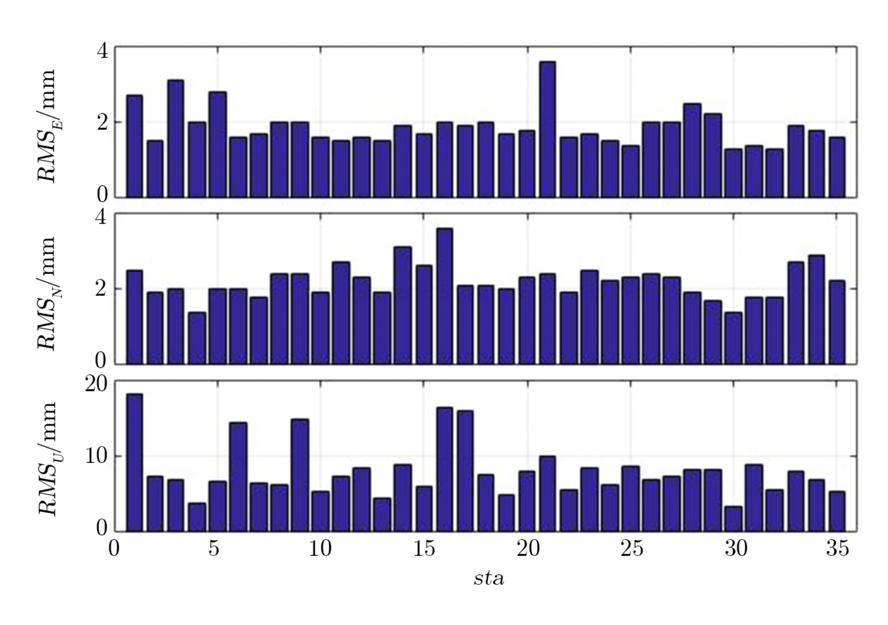


图 9　35 个区域监测站坐标时间序列扣除趋势项后残差的 RMS

3.3 台站速度场

本次采用的 GPS 观测数据时间跨度较短 (470 d)，因此只考虑线性项，通过线性拟合得到台站速度。IGb14 台站速度采用 20 多年 GPS 观测数据进行解算，并考虑周年、半周年、地震、接收机或者天线变化等各种因素进行非线性建模，最终得到精确台站速度，因此本文以 IGb14 提供的台站速度为标准对解算的 98 个 IGS 台站速度进行精度评估。图 10 为 98 个台站速度差异图，v_{SHAO} 为本文拟合的台站速度，v_{IGS} 为对 IGS 提供的台站天解坐标序列进行线性拟合得到的台站速度，v_{IGb14} 为 IGb14 提供的台站速度。从图中可以看出，v_{SHAO} 与 v_{IGS} 差异的 RMS 在 2 mm/a 以内，与 v_{IGb14} 差异水平方向在 2 mm/a 以内，垂直方向约 3 mm/a。图 10 b) 中 KOUR 台站 ($sta = 40$) 和 OUS2 台站($sta = 60$) 与 IGb14 速度水平方向差异较大，主要是由于 KOUR 在 2019 年 10 月 9 日，OUS2 在 2019 年 9 月 25 日分别更换接收机引起。

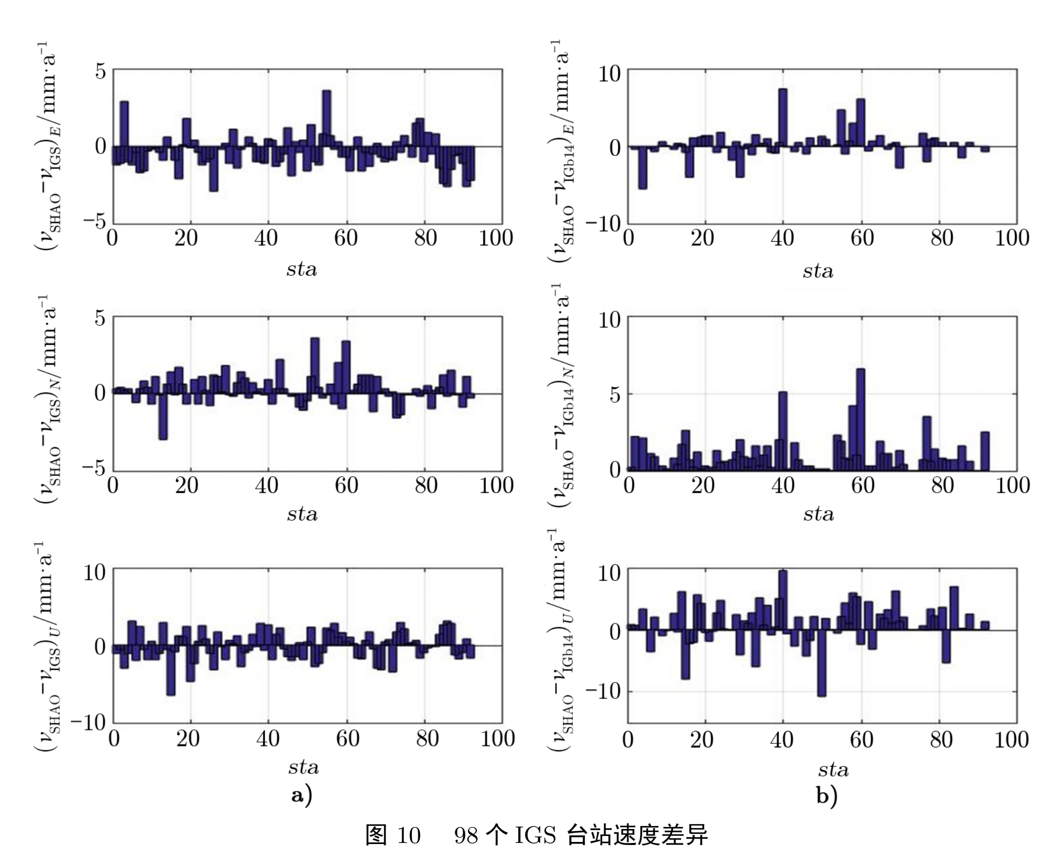


图 10 98 个 IGS 台站速度差异

对于北斗区域监测站，因为在其附近选取其他观测网络的并址台站的同时也参与解算，所以通过并址台站速度对区域监测台站速度进行精度评估。表 2 所示为北京地区各并址台站的速度值，表中 BJSH 为解算的陆态网台站速度，BJF1 为解算的 iGMAS 台站速度，BJFS (IGS) 为对 IGS 提供天解坐标时间序列进行线性拟合得到的 BJFS 台站速度，3012 为解算的北斗区域监测台站速度，BJFS (SHAO) 为解算的 BJFS 台站速度，BJFS (ITRF2014) 为

ITRF2014 提供的 BJFS 站速度，BJFS (IGb14) 为 IGb14 提供的 BJFS 台站速度。从 BJFS (SHAO) 分别与 BJFS (ITRF2014) 和 BJFS (IGb14) 速度的比较可以看出，观测数据时间跨度较短，对速度估计的精度影响水平方向约为 1 mm/a，垂直方向约为 2 mm/a。BJFS (SHAO) 与 BJFS (IGS) 相比，N 方向速度差异约 1 mm/a，E 和 U 方向差异约 2 mm/a。3012 站和 BJF1 站由于部分观测数据缺失以及未对台站序列中存在的非线性运动进行分析建模，导致两个台站速度在 E 和 U 方向精度相对较差。

表 2　北京地区并址台站速度

台站	v_N/mm·a^{-1}	v_E/mm·a^{-1}	v_U/mm·a^{-1}
BJSH	−10.3	28.4	3.1
BJF1	−11.0	26.5	−13.8
3012	−12.0	25.1	−8.3
BJFS (SHAO)	−11.8	29.3	4.4
BJFS (IGS)	−11.6	31.7	1.9
BJFS (ITRF2014)	−10.6	30.6	2.2
BJFS (IGb14)	−10.5	30.7	2.2

图 11 为中国区域并址台站的水平方向速度场图 (蓝色和红色分别代表两个不同观测网络台站)，从图中可以看出，大部分台站水平方向速度变化趋势一致性较好，部分台站差异相对较大是由观测数据时间跨度太短引起。例如图中左上方蓝色框内的台站速度，红箭头代表的台站观测数据时间跨度有 450 d，而蓝箭头代表的台站观测数据时间跨度只有 105 d。

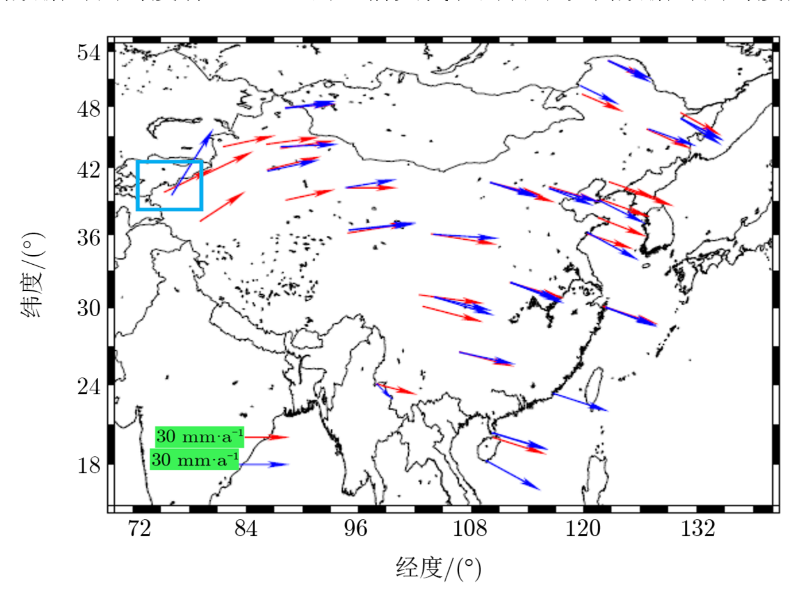


图 11　中国区域并址台站水平方向速度场

从台站速度比较可以看出，此次解算的台站速度场与 IGb14 和 ITRF2014 台站速度有

差异，一个主要原因是观测数据的时间跨度短 (470 d)，在计算台站速度时未考虑季节项、构造运动产生的跳跃项、非构造运动产生的跳跃项、震后形变和其他形变等。Blewitt 和 Lavellee[31] 研究表明，观测数据时间长度至少 2.5 a，才能得到精确的台站速度。因此随着观测数据增加，精确考虑每个台站的各种非线性因素后得到的速度精度会更高。

4　北斗单系统数据实现 BDCS 对齐 ITRF2014 的精度评估

采用 2019 年 10 月 1 日至 2020 年 3 月 19 日全球分布台站接收到的北斗观测数据实现 BDCS 并对齐 ITRF2014，并与第 3 章单 GPS 解算结果及 IGS 提供的台站坐标进行比较分析。

4.1　数据及台站分布

采用北斗单系统观测数据进行解算时，轨道和钟差产品来自于 iGMAS (http://www.igmas.org/)。由于在本文计算时，2019 年 10 月 1 日之前没有北斗 B1I 和 B3I 信号的精密钟差产品，因此选取从 2019 年 10 月 1 日至 2020 年 3 月 19 日能够接收北斗 B1I 和 B3I 频率观测数据的全球 209 个台站，包括北斗区域监测站、全球均匀分布 IGS 核心台站和 iGMAS 全球分布台站，如图 12 所示。

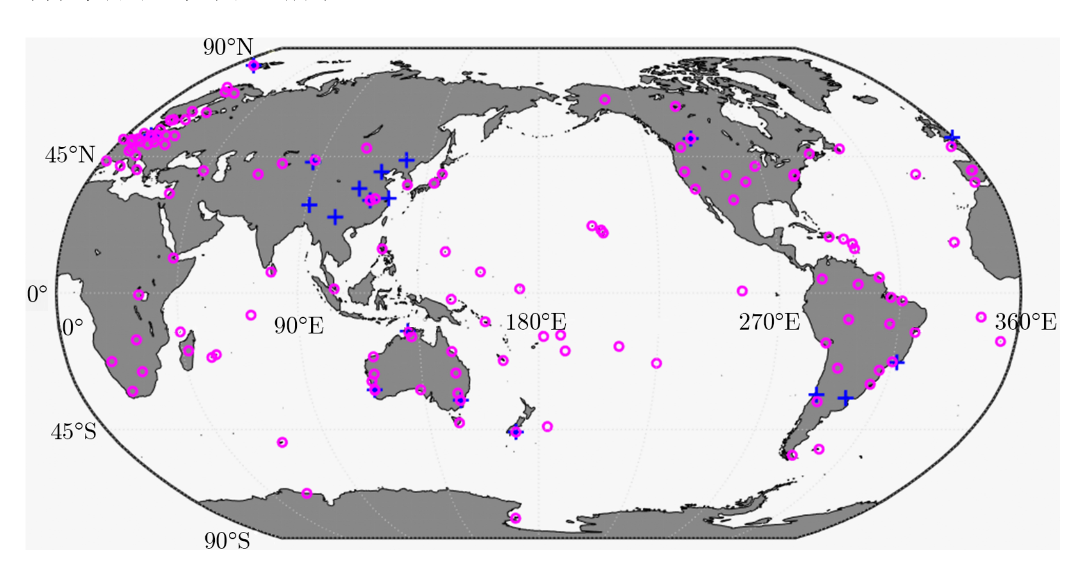
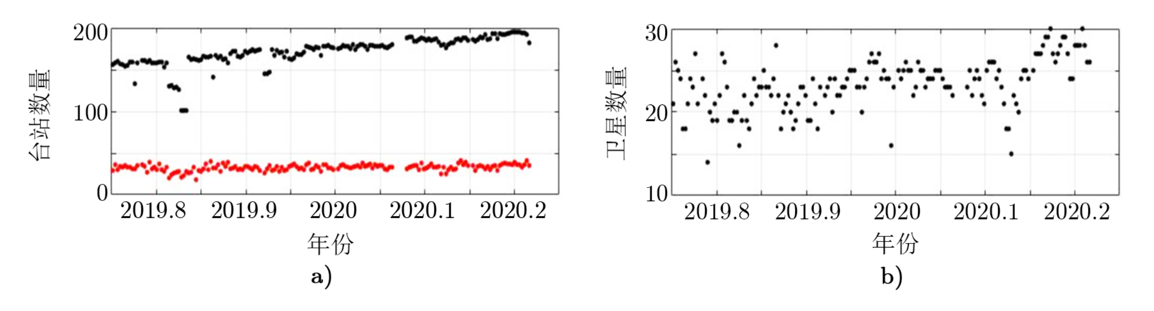


图 12　IGS 台站 (紫色) 和 iGMAS 台站 (蓝色) 分布图

把 209 个台站分成 5 个子网，从 IGS14 核心站中选取能够接收北斗三号观测数据的 40 个台站作为每个子网中的公共台站，每个子网的松约束解算方法、采用的模型、约束标准以及对齐 ITRF2014 方法如第 2 章介绍。每个历元有效台站数量、对齐 ITRF2014 的约束台站数量以及观测卫星数量如图 13 所示，2019 年 10 月每个历元有效观测台站数量约 150 个，到 2020 年 3 月增加到 200 个左右。对齐 ITRF2014 的约束台站数量从 25 个左右增加至 40

个左右，观测卫星数量从 20 个左右增加至 30 个左右。统计表明，随着时间积累，全球能够接收北斗三号卫星观测数据的台站越来越多，可用的有效观测数据和卫星数量也越来越多。



注：a) 黑色表示每个历元有效台站数量，红色表示对齐 ITRF2014 的约束台站数量；b) 卫星数量。

图 13　台站数量和卫星数量随时间分布

4.2　台站坐标精度评估

4.2.1　区域监测站坐标残差 *RMS*

通过台站坐标时间序列消除线性项后残差的 *RMS* 对 31 个区域监测站坐标精度进行分析。图 14 a) 为台站 (3172) 坐标时间序列以及拟合的线性趋势项，图 b) 为消除趋势项后的坐标残差时间序列图。图 15 为 31 个区域监测站消除线性项后残差的 *RMS* 统计图，可以看出大部分台站水平方向 *RMS* 小于 5 mm，垂直方向 *RMS* 小于 8 mm，*RMS* 均值 *E* 方向为 4.4 mm，*N* 方向为 3.4 mm，*U* 方向为 7.9 mm，结果表明北斗单系统数据解算的区域监测站坐标重复率优于 1 cm。

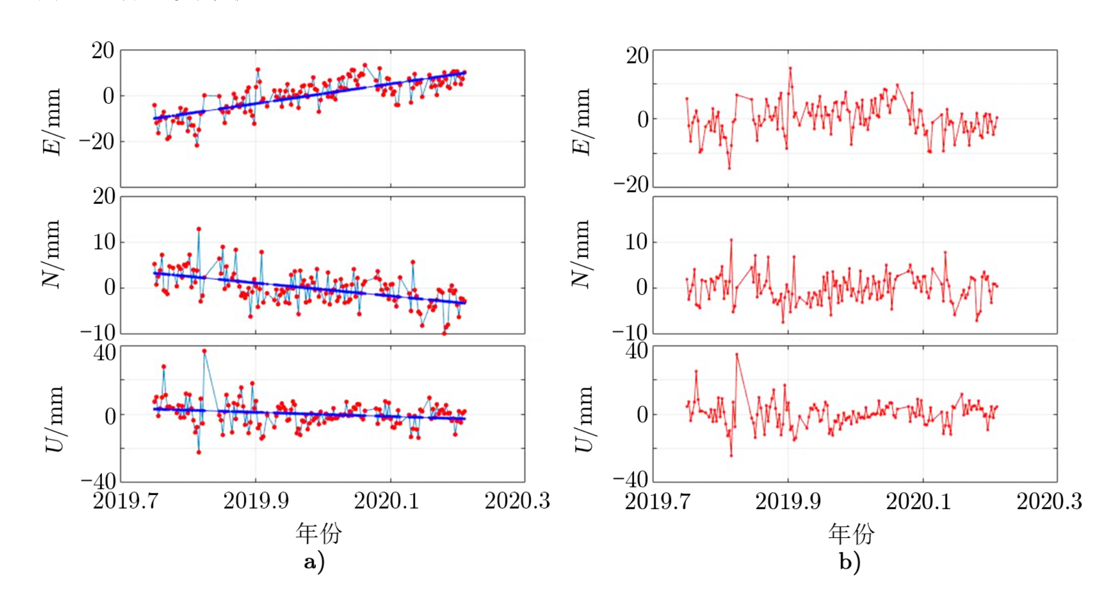


图 14　监测站 (3172) 坐标时间序列以及消除线性项后残差图

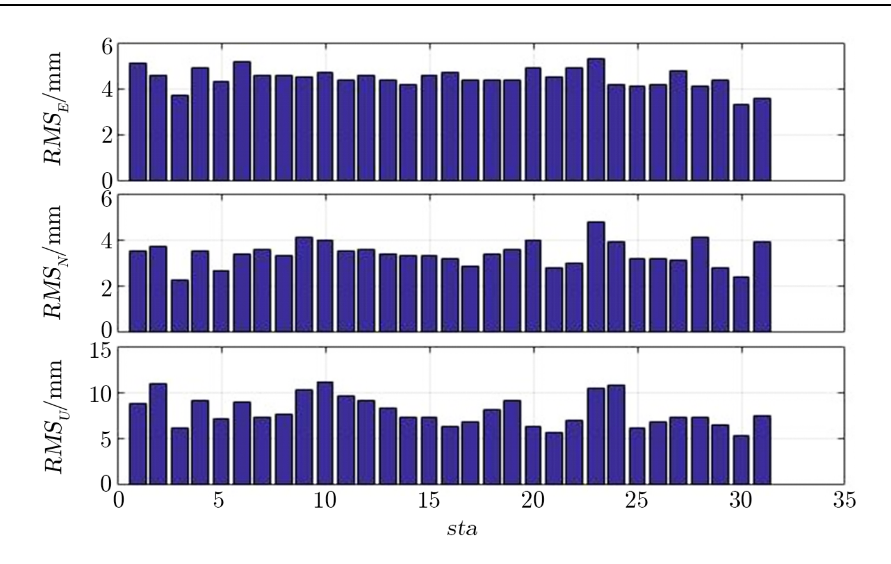
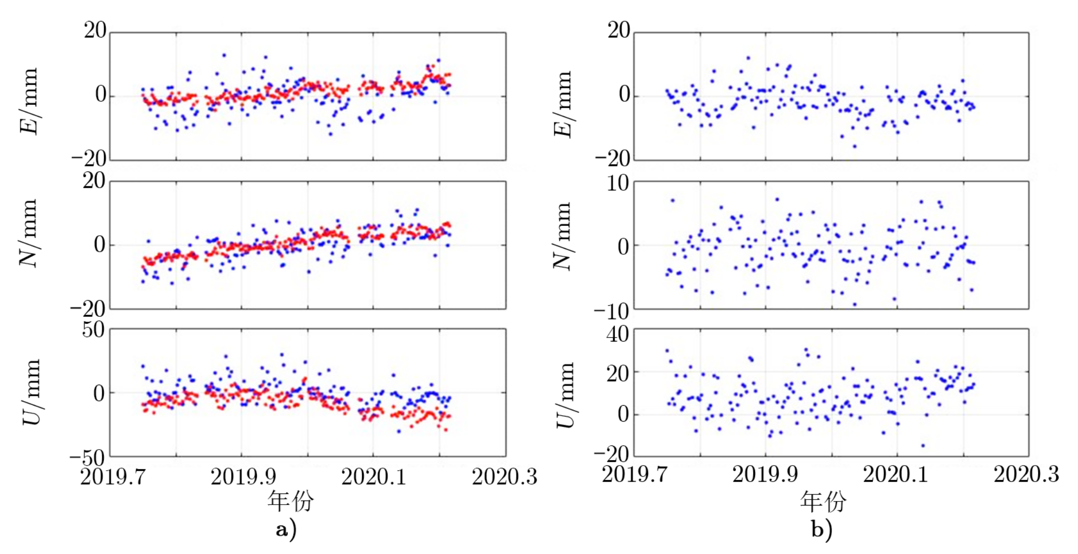


图 15 北斗单系统数据解算 31 个区域站坐标时间序列消除趋势项后残差的 RMS

4.2.2 IGS 台站坐标残差 RMS

利用 IGS 提供的台站坐标对解算的 IGS 台站坐标精度进行评估。图 16 列出 ABPO 台站坐标时间序列、IGS 提供天解台站坐标时间序列以及两种台站坐标差异的时间序列图，a) 中两种时间序列趋势性一致，但是采用 BDS 数据解算的台站坐标时间序列弥散度明显偏大。图 17 为解算的 126 个 IGS 台站坐标与 IGS 提供台站坐标差异 RMS，E 方向 RMS 均值 5.96 mm，N 方向 RMS 均值 4.5 mm，垂直方向 RMS 均值为 12.5 mm，结果表明北斗单系统观测数据解算 IGS 台站坐标重复率约为 1 cm。



注：a) BDS 数据解算台站 (蓝色) 与 IGS 天解台站 (红色) 的坐标时间序列；b) 两种坐标差异时间序列。

图 16 ABPO 台站坐标时间序列图

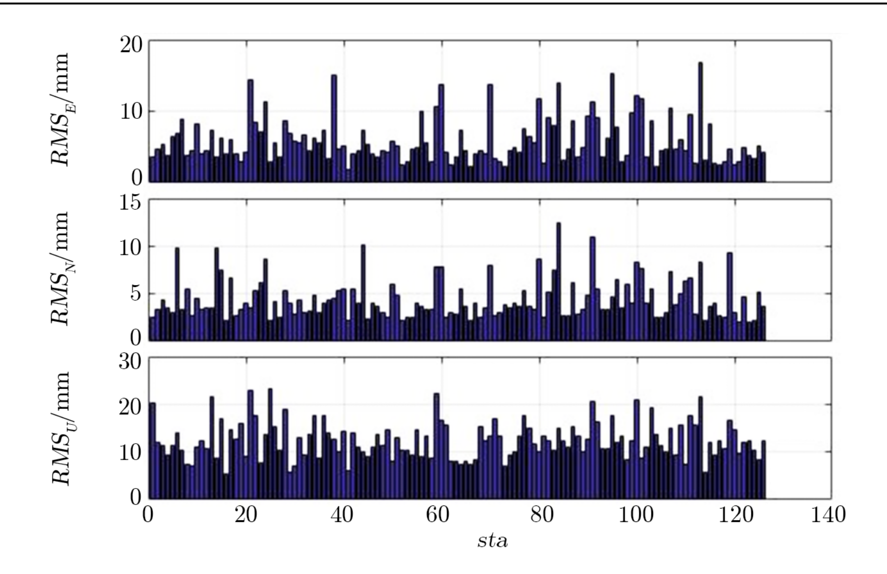
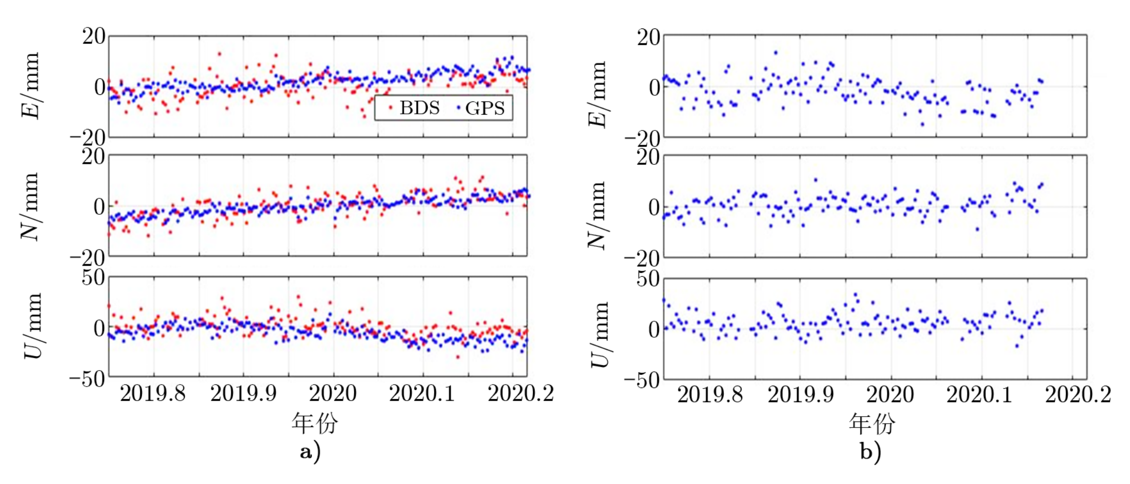


图 17　BDS 数据解算 126 个 IGS 台站坐标与 IGS 天解坐标差异的 RMS

除采用 IGS 提供的台站坐标对解算的 IGS 台站坐标进行精度评估外，我们用第 3 章中单 GPS 数据解算的台站坐标对 BDS 数据解算结果进行精度评估。图 18 为 BDS 数据和 GPS 数据分别解算 ABPO 台站坐标时间序列及两者差异图，a) 中两种时间序列趋势性一致，但是 BDS 数据解算的台站坐标时间序列弥散度偏大。图 19 为统计 BDS 数据与 GPS 数据分别解算的 106 个台站坐标差异 (IGS 台站和区域监测台站)，大部分台站坐标差异的 RMS 在水平和垂直方向分别小于 1 cm 和 2 cm，RMS 均值在 E 方向为 7.0 mm，N 方向为 4.8 mm，U 方向为 13.8 mm，结果表明单 BDS 与单 GPS 数据解算台站坐标差异优于 1.5 cm。



注：a) BDS 解算 (蓝色) 与 GPS 解算 (红色) 时间序列；b) 两者差异时间序列。

图 18　单 BDS 数据与单 GPS 数据解算 ABPO 台站坐标时间序列图

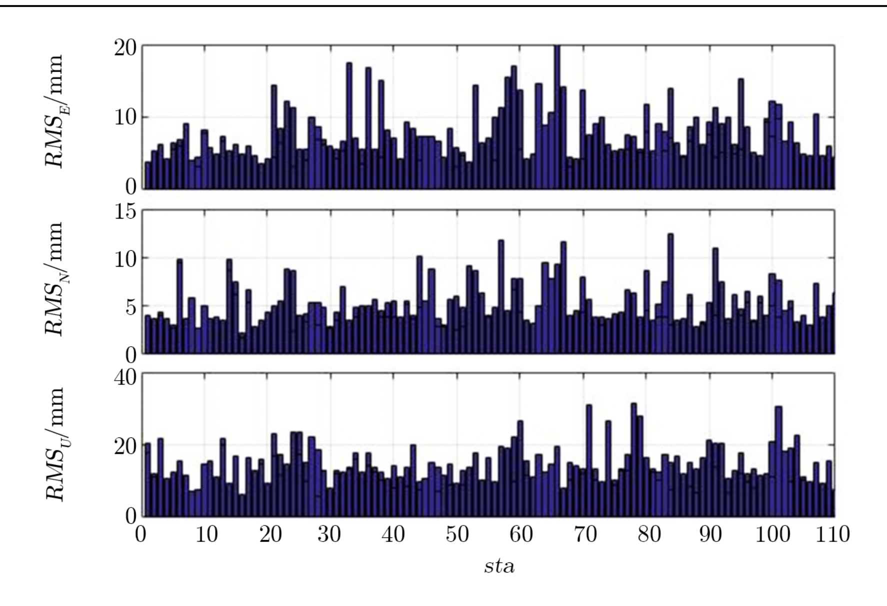


图 19 单 BDS 数据与单 GPS 解算台站坐标差异的 RMS

如前所述，图 16 和 18 显示 BDS 数据解算的台站坐标时间序列无论与 GPS 数据解算坐标时间序列还是 IGS 提供台站天解坐标时间序列比较，趋势性吻合得都较好，但是 BDS 解算台站坐标时间序列弥散度偏大。为了解释这一原因，采用几组不同观测数据和精密轨道产品解算台站坐标进行比较分析，如表 3 所示。case1 采用 209 个台站的 BDS 观测数据，BDS 精密轨道产品来自于 iGMAS，即本节解算方法；case2 采用与 case 1 相同的台站和相同时间跨度的 GPS 观测数据，GPS 精密轨道产品来自于 iGMAS；case3 采用与 case1 相同的台站和相同时间跨度的 GPS 观测数据，GPS 精密轨道产品来自于 IGS；case4 为 IGS 提供单天台站坐标解 (SINEX 格式)，作为参考标准对其他 3 组解算结果进行评估。

表 3 4 组不同试验介绍

case	台站数量	观测数据时间跨度	观测数据类型	精密轨道产品
1	209	2019/10/01－2020/03/19	BDS	iGMAS
2	209	2019/10/01－2020/03/19	GPS	iGMAS
3	209	2019/10/01－2020/03/19	GPS	IGS
4	大于 300	2019/10/01－2020/03/19	GPS	IGS

图 20 为 case2, case3 和 case4 分别解算的 ABPO 台站坐标时间序列，图中 case2 和 case3 的台站坐标时间序列弥散度都略大于 case4。图 21 a) 为 case2 和 case3 解算的 140 个 IGS 台站坐标时间序列差异的 RMS 统计图，RMS 均值在水平方向小于 4 mm，垂直方向为 5.3 mm。case2 和 case3 采用相同的 GPS 观测数据，精密轨道分别来自于 iGMAS 和 IGS，结果表明 iGMAS 的轨道产品与 IGS 轨道产品精度相当，这与 iGMAS 评估结果一致[38]。图 21 b) 为 case3 和 case4 解算的 125 个 IGS 台站坐标时间序列差异的 RMS 统计

图，RMS 均值水平方向小于 4 mm，垂直方向为 6.2 mm。case3 和 case4 采用相同 GPS 观测数据和 IGS 精密轨道，IGS 选取的台站相对更多，各分析中心数据处理时同时解算卫星轨道和钟差，通过 IGS 分析中心综合剔除粗差，因此 case4 台站坐标时间序列弥散度会相对偏小。

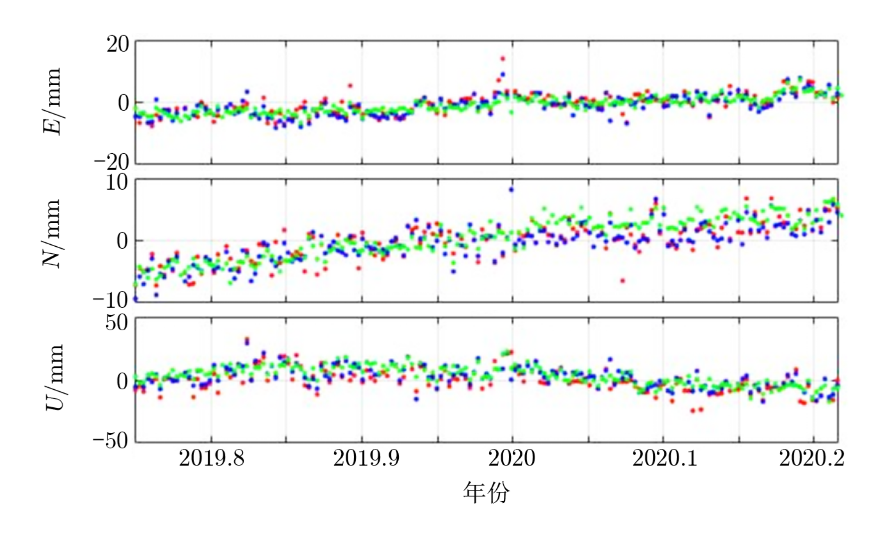


图 20　case2 (红色)、case3 (蓝色) 和 case4 (绿色) 分别解算的 ABPO 台站坐标时间序列

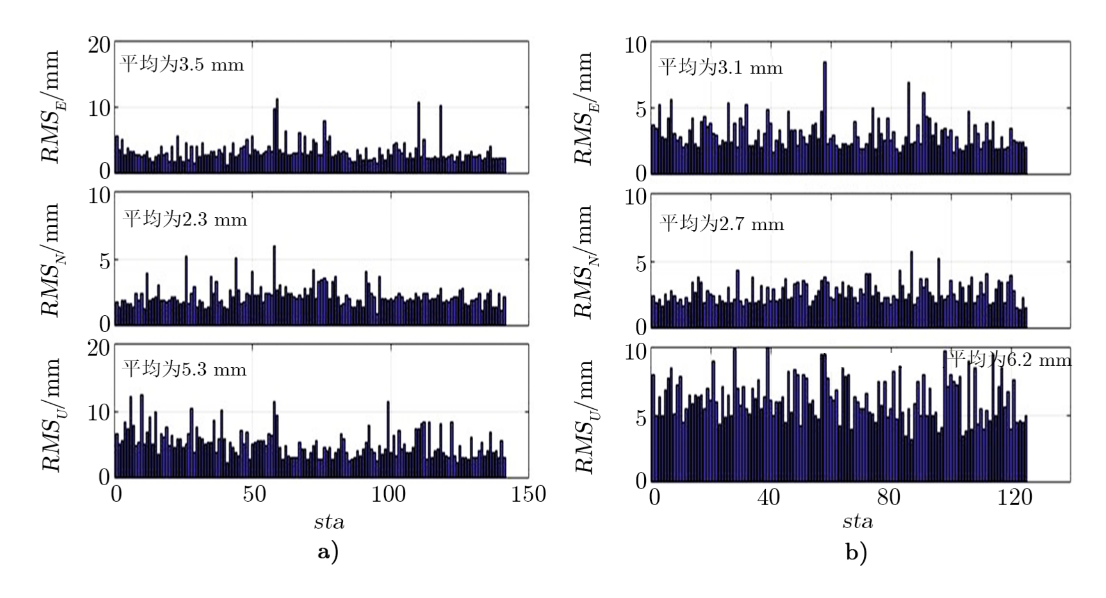


图 21　case2 和 case3 解算的 140 个 IGS 台站坐标时间序列互差的 RMS 统计

图 22 a) 为 case1 和 case2 分别解算的 ABPO 台站坐标时间序列，两种时间序列弥散度也同样大于 case4 的台站坐标时间序列，case1 与 case4 的弥散度差异相对更大。case1 和 case2 分别采用 BDS 和 GPS 观测数据，精密轨道都来自 iGMAS，因此两者差别主要来自

不同的卫星系统数据和相应的分析模型。图 22 b) 为 case1 和 case2 解算的 140 个 IGS 台站坐标差异的 *RMS* 统计图，*RMS* 均值水平方向 7 mm 以内，垂直方向为 13.7 mm，表明北斗系统分析模型、观测数据质量、卫星覆盖率以及可用的卫星数相对较少等是引起台站坐标时间序列弥散度大的另一个原因。随着以后北斗观测数据以及可用卫星数量增加，我们将对具体原因进行更详细深入的分析。

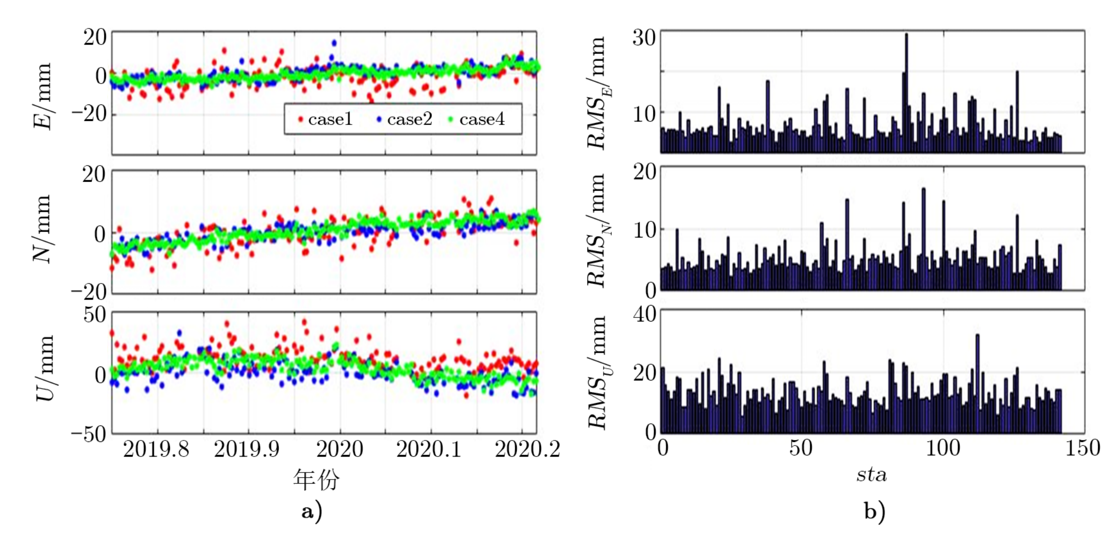


图 22 a) case1 (红色)、case2 (蓝色) 和 case4 (绿色) 解算 ABPO 台站坐标时间序列；b) case1 和 case2 解算 IGS 台站坐标差异的 *RMS*

4.2.3 赫尔默特转换参数

对某一参考框架与 ITRF 之间的赫尔默特转换参数进行分析,可以探究参考框架对齐 ITRF 的自洽性和稳定性。图 23 为采用 BDS 数据和 GPS 数据，通过约束 IGS 核心台站，分别得到的每个历元参考框架对齐 ITRF2014 的 7 参数时间序列。图 23 a) 中 T_x, T_y 和 T_z 分别为平移参数，最下面图为尺度时间序列，图 23 b) 为 3 个旋转参数时间序列图。从图中看出单 GPS 数据解算的 7 参数时间序列更加平稳，BDS 数据解算的时间序列弥散度偏大，尤其在 2019 年 10 月和 11 月期间，这可能是由于北斗三号系统运行初期，可用卫星数量、观测数据相对较少等原因引起，也可能是由于目前北斗导航系统中可能存在的误差，例如卫星相位中心模型、卫星轨道光压模型等引起的不稳定误差进入 7 参数中。随着北斗系统更加稳定运行，积累的观测数据更长，我们将对 7 个转换参数进行更加详细精确的分析。

5 结 论

本文采用 2019 年 10 月 1 日至 2020 年 3 月 19 日北斗区域监测站和 IGS 台站的北斗观测数据，初步尝试实现历元 BDCS 对齐 ITRF2014，估计每个历元台站精确坐标。利用 2019 年 1 月 1 日至 2020 年 4 月 20 日 GPS 观测数据的计算结果以及 IGS 提供的天解台站

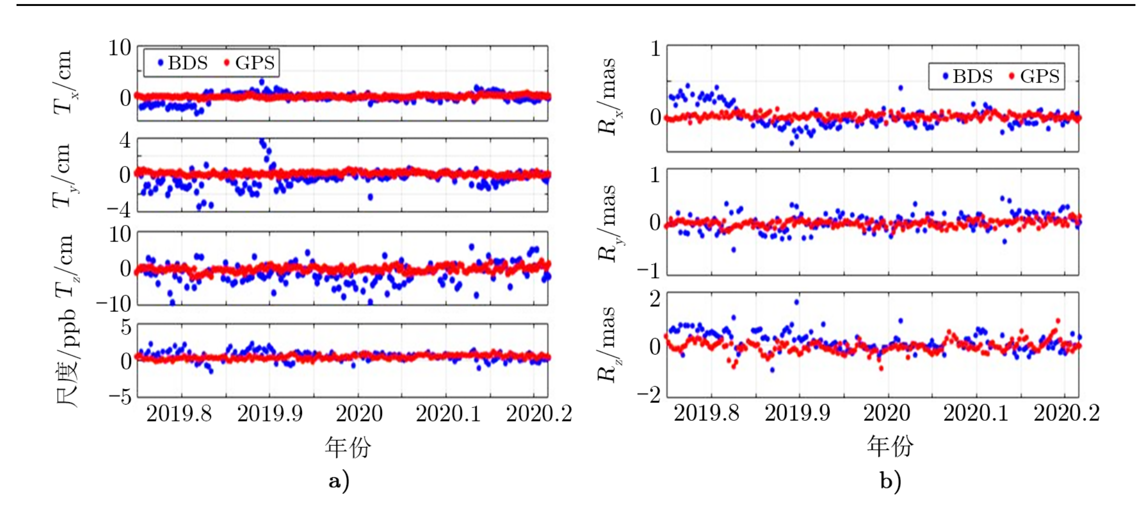


图 23　采用 BDS 数据 (蓝色) 和 GPS 数据 (红色) 分别实现每个历元参考框架对齐 ITRF2014 的 7 参数时间序列

坐标时间序列进行台站坐标精度评估，所得主要结果如下：

(1) 单 GPS 数据解算 IGS 台站和区域监测站坐标重复率优于 1 cm。

(2) 北斗单系统数据解算 IGS 台站坐标与 IGS 天解台站坐标差异的 RMS 均值小于 1 cm，与 GPS 结果互差 RMS 均值小于 1.5 cm，台站坐标时间序列变化趋势相一致；北斗单系统数据解算的区域监测站坐标时间序列，扣除线性速度之后残差的 RMS 均值优于 1 cm。

(3) 北斗单系统数据解算台站坐标时间序列弥散度偏大，这可能与框架台站分布以及 BDS 卫星数据质量等原因有关。北斗单系统数据实现 BDCS 对齐 ITRF2014 的历元 7 参数时间序列弥散度偏大，可能与北斗导航系统中存在的误差和可用卫星数量及观测数据量少等原因有关。

(4) 利用 GPS 数据初步实现区域台站初步速度场解算，随着数据的累积，有望利用北斗单系统数据实现台站的速度高精度估计。

(5) 随着 BDS 的稳定运行，后续有望综合利用 BDS, GPS 和 Galileo 获得精度更高、更稳定的参考框架。

致谢

感谢中国地震台网中心提供陆态网台站 GPS 观测数据，iGMAS 提供精密产品、BDS 以及 GPS 观测数据，IGS 组织提供精密产品、BDS 以及 GPS 数据。感谢 MIT 提供 GAMIT 软件。

参考文献：

[1] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统应用服务体系(1.0版), http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/, 2019
[2] Cao Y L, Hu X G, Chen J P, et al. GPS Solutions, 2019, 23: 35
[3] Zhao L Q, Hu X G, Tang C P, et al. Advances in Space Research, 2020, 66(3): 702
[4] Tang C P, Hu X G, Zhou S S, et al. Journal of Geodesy, 2018, 92: 1155
[5] 唐成盼, 宿晨庚, 胡小工, 等. 测绘学报, 2020, 49(9): 1131
[6] 唐成盼, 胡小工, 周善石, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47(2): 501
[7] Pan J Y, Hu X G, Zhou S S, et al. Advance in Space Research, 2018, 61: 145
[8] 潘军洋, 胡小工, 唐成盼, 等. 科学通报, 2017, 62: 2671
[9] Chen J P, Hu X G, Tang C P, et al. Sci China-Phys Mech Astron, 2020, 63(6): 9511
[10] Altamimi Z, Rebischung P, Metivier L, et al. JGR: Solid Earth, 2016, 121(8): 6109
[11] Stephen Malys. Evolution of the World Geodetic System 1984 (WGS 84) Terrestrial Reference Frame, Xi'an: ICG, 2018
[12] National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). Standardization Document Department of Defense, US: NGA, 2014
[13] Werner E. Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF)-Status, Xi'an: ICG, 2018
[14] Gendt G, Altamimi Z, Dach R, et al. Advances in Space Research, 2011, 47: 174
[15] Schoenemann E, Enderle W, Zandbergen R, et al. Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF)-Status update GRTF is Provided under a Contract with Spaceopal, Vienna: ICG, 2021
[16] Gusev I. New Transformation Parameters at Epoch 2010.0 from PZ-90.11 to ITRF2014, Xi'an: ICG, 2018
[17] Gusev I. GLONASS Reference Frame Evolution, Bangalore: ICG, 2019
[18] Mazurova E, Kopeikin S, Karpik A. Stud Geophys Geod, 2017, 61: 616
[19] Military Topographic Department of the General Staff of Armed Forces of the Russian Federation. "Parametry Zemli 1990" (PZ-90.11): Reference Document, Moscow: VTU Gsh, 2014
[20] 陈俊勇, 杨元喜, 王敏, 等. 测绘学报, 2007, 36 (1): 1
[21] 杨元喜. 科学通报, 2009, 54(16): 2271
[22] 魏子卿. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5): 1
[23] 中国卫星导航系统管理办公室. http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/, 2022
[24] 魏子卿, 吴富梅, 刘光明. 测绘学报, 2019, 48(7): 805
[25] Wu F. BeiDou Coordinate System and Its First Realization, Xi'an: ICG, 2018
[26] 施闯, 魏娜, 李敏, 等. 武汉大学学报, 2017, 42(11): 1635
[27] Liu L, Xu J Y, Zhou S S, et al. Update on the BeiDou Coordinate System (BDCS), Bangalore: ICG, 2019
[28] Liu L, Xu J Y, Zhou S S. Development and Update Strategy of BeiDou Reference Frame, Xi'an: ICG, 2018
[29] Liu L, Zhou S S, Xu J Y, et al. Update on the BeiDou Coordinate System (BDCS), Vienna: ICG, 2021
[30] 周善石, 刘利, 曲伟菁, 等. 北斗坐标系 (BDCS) 实现及精度评估, 成都: China satellite navigation, 2020
[31] Blewitt G, Lavallee D. JGR: Solid Earth, 2002, 207(B7): 1
[32] Herring T A, King R W, McClusky S C. Introduction to GAMIT, Cambridge: Massachusetts Institute of Techonology, 2010
[33] 董大南, 陈俊平, 王解先. GNSS高精度定位原理. 北京: 科学出版社, 2018: 240
[34] Tregoning P, van Dam T. JGR, 2005, 110(3): 1
[35] Collilieux X, van Dam T, Ray J, et al. J Geodesy, 2012, 86: 1
[36] Petit G, Luzum B. IERS Conventions (2010), US: IERS, 2010
[37] Springer T A, Beutler G, Rothacher M. GPS SOLUT, 1999, 3(2): 50
[38] iGMAS team. Progress of iGMAS and IGMA Joint Trial Project, Kyoto: ICG, 2017

Accuracy Evaluation of Aligning BeiDou Coordinate System to ITRF2014 Based on BeiDou Observations

QU Wei-jing[1], LIU Li[2], ZHOU Shan-shi[1], XU Jun-yi[2], YANG Yu-fei[2], HU Xiao-gong[1], GUO Rui[2], WU Bin[1], DONG Ming[3], TAND Cheng-pan[1], LI Xiao-jie[2], LIU Shu-ai[2]

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China; 2. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100092, China; 3. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on GPS observations, the BeiDou coordinate system (BDCS) (2019v01) aligned to ITRF2014 was released in December 2019 and the alignment accuracy is at millimeter level. With the continuous accumulation of BeiDou Satellite Navigation System (BDS) observations, it should be used to the alignment and maintenance of BDCS. In this paper, we align BDCS to ITRF2014 using BDS observations from October 1, 2019 to March 19, 2020. The daily station coordinates obtained by using GPS observations from global distribution stations and that from the International GPS Service (IGS) from January 1, 2019 to April 19, 2020 are used to evaluate the accuracy of the station coordinates estimated by using BDS observations. The average root-mean-square (RMS) of the daily IGS station coordinate differences between using BDS observations and from IGS analysis center is less than 1 cm. The average RMS of the daily station coordinate differences between using GPS and BDS observations is less than 1.5 cm. The scatter of station coordinates solutions using BDS observation is relatively large, which is preliminary explained in this paper. The velocities of the regional monitoring stations are estimated using GPS observations of 470 days. With the stable operation of BDS and continued accumulation of BDS observations, we expect to obtain higher accuracy of station coordinates, velocity, and the alignment to ITRF.

Key words: BeiDou Satellite Navigation System; BeiDou coordinate system; International celestial reference frame